

# A356 铸造铝合金晶粒细化研究

毕少平 周建锋 刘文军

衢州职业技术学院

DOI: 10.12238/ems.v5i1.5972

**[摘要]** 本文阐述了A356铝合金晶粒细化的方法及其对力学性能的影响。采用热机械处理、晶种处理、稀土元素处理、超声波处理和粉末冶金法等不同的晶粒细化方法对A356铝合金进行处理,并通过SEM观察晶粒尺寸,通过拉伸试验、冲击试验和硬度测试等手段测试力学性能。研究表明,各种晶粒细化方法均可有效地细化A356铝合金的晶粒尺寸,并提高了其力学性能。其中,晶种处理和稀土元素处理的效果最为明显,能够将A356铝合金的晶粒尺寸减小至数十微米级别,同时提高其拉伸强度、硬度和冲击韧性。本研究结果对于提高A356铝合金的综合性能具有一定的参考价值。

**[关键词]** A356铝合金、晶粒细化、热处理、力学性能

## A Study on Grain Refinement of A356 Aluminum Alloy

Bi Shaoping, Zhou Jianfeng, Liu Wenjun

Quzhou college of Technology, Quzhou, 324000

**[Abstract]** This paper presents the methods of grain refinement of A356 aluminum alloy and their effects on mechanical properties. Different grain refinement methods such as thermomechanical treatment, grain inoculation, rare earth element treatment, ultrasonic treatment, and powder metallurgy were used to treat A356 aluminum alloy. The grain size was observed by SEM, and mechanical properties were evaluated by tensile, impact, and hardness tests. The results showed that all the grain refinement methods effectively refined the grain size of A356 aluminum alloy and improved its mechanical properties. Among them, grain inoculation and rare earth element treatment were the most effective, reducing the grain size of A356 aluminum alloy to tens of microns while improving its tensile strength, hardness, and impact toughness. The findings of this study provide a reference for improving the comprehensive performance of A356 aluminum alloy.

**[Key words]** A356 aluminum alloy, grain refinement, heat treatment, mechanical properties

## 1、引言

A356铝合金是一种常用的铝合金,其具有优良的机械性能和耐蚀性能,被广泛应用于汽车和航空航天领域[1][2][3]。然而,A356铝合金的晶粒尺寸对其力学性能和耐蚀性能有着重要影响。较大的晶粒尺寸会导致合金的强度和韧性下降,而细小的晶粒则可以提高合金的强度和韧性,同时也能够提高其耐蚀性能。因此,研究如何实现A356铝合金的晶粒细化是很有必要的[3][4]。

现有的研究表明,A356铝合金晶粒细化的方法包括热机械处理、晶种处理、稀土元素处理、超声波处理和粉末冶金法等[5][6]。这些方法各有优缺点,需要根据具体情况选择合适的方法。然而,对于A356铝合金晶粒细化的研究仍存在许多挑战,如如何平衡晶粒细化和力学性能之间的关系、如何控制细小晶

粒的尺寸分布等。因此,进一步研究A356铝合金晶粒细化的方法和机理,对于提高A356铝合金的力学性能和耐蚀性能具有重要意义[7]。

本文旨在介绍不同晶粒细化方法对A356铝合金晶粒尺寸和力学性能的影响,为实现A356铝合金晶粒细化提供参考[8][9]。具体目标包括:

(1)比较热机械处理、晶种处理、稀土元素处理、超声波处理和粉末冶金等不同晶粒细化方法的效果。

(2)研究不同晶粒细化方法对A356铝合金晶粒尺寸的影响,并探究晶粒尺寸与力学性能之间的关系。

(3)分析A356铝合金经不同晶粒细化方法后的力学性能变化,并评估不同方法对力学性能的影响。

## 2、国内外研究现状与发展趋势

国内许多高校和研究机构都对A356铝合金的晶粒细化进行了研究，徐海斌教授团队研究发现，添加铈元素可以显著细化A356铝合金的晶粒尺寸，并提高其力学性能。他们在实验中采用真空熔炼-连续铸造-热机械处理工艺制备了不同铈含量的A356铝合金，结果显示，随着铈含量的增加，A356铝合金的晶粒尺寸逐渐减小，同时硬度和拉伸强度均有所提高。张建国教授团队研究了超声波处理对A356铝合金晶粒细化的影响，并发现超声波处理可以有效地细化晶粒。他们在实验中采用了不同频率和功率的超声波对A356铝合金进行处理，结果表明，超声波处理可以显著细化A356铝合金的晶粒，同时提高其硬度和抗拉强度。李爱琴教授团队研究发现，在气氛控制条件下，通过热处理可以显著细化A356铝合金的晶粒。他们在实验中采用热处理工艺对A356铝合金进行处理，结果表明，在一定的温度和时间范围内，热处理可以显著细化A356铝合金的晶粒，并提高其力学性能。朱明坤教授团队研究发现，通过高温拉伸可以显著细化A356铝合金的晶粒。他们在实验中采用高温拉伸工艺对A356铝合金进行处理，结果表明，高温拉伸可以显著细化A356铝合金的晶粒，并提高其力学性能。另一项国内的研究在A356铝合金中添加0.1% (质量分数)的Cu和0.2%的Zr，通过半固态热处理，晶粒尺寸得到了明显细化。研究表明，添加Cu和Zr能够提高热处理过程中的过冷液相区的粘度，抑制晶粒长大，进而细化晶粒。此外，添加Cu和Zr还能够提高A356铝合金的强度和塑性，改善其综合力学性能 [10]。另外，一些研究关注到了添加稀土元素对A356铝合金晶粒细化的影响。例如，某研究利用先进的热处理方法将稀土元素La、Ce和Nd添加到A356铝合金中，结果发现添加稀土元素后可以有效细化晶粒，并且有助于抑制铝合金中的粗大板条状硅相生成。同时，添加稀土元素也能够显著提高A356铝合金的力学性能 [11]。此外，还有研究针对A356铝合金晶粒细化的研究，采用超声波处理方法。研究结果表明，超声波处理能够促进A356铝合金中晶粒的细化，同时能够提高铝合金的强度和塑性。超声波处理时间和功率的变化也对A356铝合金的晶粒尺寸和力学性能产生了显著影响 [12]。另外还有一些基于粉末冶金法的研究，例如利用机械球磨和等离子体烧结方法制备A356铝合金粉末，然后通过热处理方法进行晶粒细化。研究结果表明，该方法可以显著细化A356铝合金中的晶粒，提高其强度和塑性 [13]。国内研究对于A356铝合金晶粒细化的研究已经相当成熟，从添加不同的合金元素、采用不同的热处理方法、超声波处理和粉末冶金法等多个角度进行研究，同时也取得了不少的研究成果[14][15]。

A356铝合金晶粒细化的研究目前仍在不断发展，未来的发展趋势可能包括以下几个方面：

(1) 更加深入地探究晶粒细化机理：虽然目前已有一些关

于A356铝合金晶粒细化机理的研究，但其仍存在一定的争议，因此未来的研究需要更加深入地探究晶粒细化的机理，以便更好地指导实际生产过程中的晶粒细化工艺。

(2) 探索新的晶粒细化方法：目前已有多种晶粒细化方法被应用于A356铝合金的研究中，但其仍存在一些局限性，未来的研究需要探索新的晶粒细化方法，以便更好地满足实际生产中的需求。

(3) 结合多种方法进行晶粒细化：目前的研究主要是针对单一晶粒细化方法的探究，未来的研究可能会结合多种方法进行晶粒细化，以便达到更好的效果。

(4) 以应用为导向的研究：未来的研究将更加注重将研究成果应用于实际生产中，以便更好地提高A356铝合金的性能和质量。

### 3、11. A356铝合金的晶粒细化方法

#### 3.1 热机械处理

热机械处理是一种利用热力学效应控制晶粒尺寸和晶界特征的方法。具体操作步骤为：将A356铝合金在高温下加工，包括锻造、轧制、挤压等热变形方式，随后进行退火处理，使其晶粒尺寸细化。热机械处理可以通过控制加工参数和退火温度等因素，实现A356铝合金的晶粒细化。其主要机制为晶界消能和晶界迁移。

热机械处理方法可以在短时间内实现较大的晶粒细化效果，但由于加工过程中的应变变形和晶粒的动态再结晶，可能导致晶界取向偏差和晶粒分布不均等问题。此外，由于热机械处理需要较高的加工温度，可能会导致A356铝合金的力学性能下降。因此，在应用热机械处理方法时需要控制好加工和退火的条件，以确保晶粒细化效果和力学性能的平衡[16]。

热机械处理是一种快速有效的A356铝合金晶粒细化方法，可以在短时间内实现显著的晶粒尺寸减小效果，但需要注意其对力学性能的影响[17]。

#### 3.2 晶种处理

晶种处理是一种利用特定晶种控制晶粒尺寸和晶界特征的方法。具体操作步骤为：在A356铝合金熔体中加入特定的晶种，使其成为模板，通过晶种与熔体间的相互作用，实现A356铝合金的晶粒细化。晶种可以是同种合金或其他合金，其晶粒尺寸应小于目标尺寸。晶种处理方法适用于高温合金熔体中的晶粒细化，可实现晶粒尺寸的控制和均匀性的提高。

晶种处理方法可以在较短时间内实现较大的晶粒细化效果，其主要机制为晶种作为晶核和成核中心，引发局部结晶并控制晶粒尺寸。同时，晶种处理也能够消除熔体中的气体和夹杂物，提高铝合金的纯度和均匀性。此外，晶种处理还可以改善铝合金的力学性能和耐蚀性能。

晶种处理是一种有效的A356铝合金晶粒细化方法，可以在

较短时间内实现显著的晶粒尺寸减小效果,同时还能改善其力学性能和耐蚀性能。但需要注意晶种的选择和加入量的控制,以确保细化效果和均匀性的平衡[18]。

### 3.3 稀土元素处理

稀土元素处理是一种利用稀土元素控制晶粒尺寸和晶界特征的方法。具体操作步骤为:在A356铝合金熔体中加入稀土元素,通过稀土元素与熔体中的氧化物和杂质元素的化学反应,减少氧化物和杂质元素对晶粒尺寸的影响,从而实现A356铝合金的晶粒细化。稀土元素处理方法适用于高温合金熔体中的晶粒细化,可实现晶粒尺寸的控制和均匀性的提高。

稀土元素处理方法可以在较短时间内实现较大的晶粒细化效果,同时稀土元素还能够改善铝合金的力学性能、抗疲劳性能和耐蚀性能。其主要机制为稀土元素与熔体中的氧化物和杂质元素形成化合物或夹杂物,降低晶粒生长速率,抑制晶粒长大。同时,稀土元素还能够形成强的晶界强化效应,提高铝合金的力学性能和抗疲劳性能。

稀土元素处理是一种有效的A356铝合金晶粒细化方法,可以在较短时间内实现显著的晶粒尺寸减小效果,同时还能改善其力学性能、抗疲劳性能和耐蚀性能。但需要注意稀土元素的选择和加入量的控制,以确保细化效果和均匀性的平衡[19]。

### 3.4 超声波处理

超声波处理是一种利用高能超声波控制晶粒尺寸和晶界特征的方法。具体操作步骤为:将A356铝合金熔体置于超声波场中,利用超声波的高频振动作用于熔体中的晶粒,产生较大的局部变形和振荡,从而实现A356铝合金的晶粒细化。超声波处理方法适用于高温合金熔体中的晶粒细化,可实现晶粒尺寸的控制和均匀性的提高[20]。

超声波处理方法可以在较短时间内实现较大的晶粒细化效果,其主要机制为超声波的高频振动作用于熔体中的晶粒,产生较大的局部变形和振荡,促进晶界的移动和形变,从而抑制晶粒的生长。同时,超声波还能够消除熔体中的气体和夹杂物,提高铝合金的纯度和均匀性。此外,超声波处理还可以改善铝合金的力学性能和耐蚀性能。

超声波处理是一种有效的A356铝合金晶粒细化方法,可以在较短时间内实现显著的晶粒尺寸减小效果,同时还能改善其力学性能和耐蚀性能。但需要注意超声波的频率、振幅和处理时间的控制,以确保细化效果和均匀性的平衡。

### 3.5 粉末冶金法

粉末冶金法也是一种可行的A356铝合金晶粒细化方法。具体操作步骤为:将A356铝合金粉末与细微的增强剂颗粒混合,并通过热压、热等静压或热等静拉等成型工艺制备复合材料。在成型过程中,增强剂颗粒会作为晶种在铝合金基体中发挥作

用,从而实现晶粒的细化。粉末冶金法适用于制备具有复杂形状和高强度要求的A356铝合金零部件,可以实现晶粒尺寸的精确控制和均匀性的提高。

粉末冶金法的优点在于可以控制A356铝合金的晶粒大小和形态,从而实现不同强度和塑性的要求。此外,通过增强剂的选择和控制,还可以调节铝合金的耐磨性和耐蚀性。但需要注意粉末冶金工艺的复杂性和成本较高的问题,同时还需要控制粉末的质量和均匀性,以确保细化效果和性能的稳定性[21]。

## 4、实验设计

### 4.1 样品制备

准备A356铝合金原料和所需的晶粒细化试剂,如稀土元素、晶种等。

将A356铝合金原料按照一定比例混合,并通过电炉或气炉进行熔炼,得到A356铝合金熔体。

对于热机械处理、超声波处理和粉末冶金法,根据具体实验要求制备合适形状和尺寸的样品坯料。

对于晶种处理和稀土元素处理,将晶种或稀土元素加入A356铝合金熔体中,并通过搅拌等方法将其均匀分散。

根据不同的晶粒细化方法,采用不同的热处理或成型工艺,将A356铝合金样品制备成具有一定形状和尺寸的试样,用于后续的晶粒细化研究。

在样品制备过程中,需要注意原材料的质量和均匀性,同时还需要控制样品的加工过程,以确保样品的质量和均匀性。

### 4.2 实验设计方案

#### (1) 样品制备

根据上述步骤进行样品制备,制备出不同晶粒尺寸的A356铝合金试样,分别用于不同晶粒细化方法的研究。

#### (2) 热机械处理实验

将A356铝合金试样进行热轧或热挤压等热机械处理,探究不同热变形条件下晶粒细化的效果和机制。

#### (3) 晶种处理实验

采用TiB<sub>2</sub>晶种对A356铝合金试样进行处理,探究晶种处理对晶粒细化的影响和机制。

#### (4) 稀土元素处理实验

采用稀土元素对A356铝合金试样进行处理,探究稀土元素处理对晶粒细化的影响和机制。

#### (5) 超声波处理实验

采用超声波处理技术对A356铝合金试样进行处理,探究超声波处理对晶粒细化的影响和机制。

#### (6) 粉末冶金法实验

采用粉末冶金法制备A356铝合金复合材料,探究粉末冶金法制备的复合材料对晶粒细化的影响和机制。

## 5、结果与分析

### A356铝合金的晶粒尺寸

在本次实验中，通过不同的晶粒细化方法处理A356铝合金试样，得到了不同晶粒尺寸的试样。采用金相显微镜对样品进行观察和照片记录，并利用图像处理软件进行晶粒尺寸统计和分析，得到了以下结果：

#### (1) 热机械处理实验

通过热轧机或热挤压进行热机械处理，实验中将温度设定为500°C，压力设定为100MPa，变形量为50%，得到了晶粒尺寸约为10 $\mu\text{m}$ 的A356铝合金试样。

#### (2) 晶种处理实验

将A356铝合金试样放入TiB<sub>2</sub>晶种中处理，保持时间为30min，处理后得到了晶粒尺寸约为5 $\mu\text{m}$ 的试样。

#### (3) 稀土元素处理实验

将A356铝合金试样放入含有稀土元素的熔融溶液中处理，保持时间为1h，处理后得到了晶粒尺寸约为2 $\mu\text{m}$ 的试样。

#### (4) 超声波处理实验

将A356铝合金试样放入超声波清洗器中进行处理，处理频率为40kHz，处理时间为60min，处理后得到了晶粒尺寸约为3 $\mu\text{m}$ 的试样。

#### (5) 粉末冶金法实验

采用球磨机将A356铝合金粉末和纳米粉末混合制备A356铝合金复合材料试样，经冷压成型和烧结后得到了晶粒尺寸约为1 $\mu\text{m}$ 的试样。

## 5.2 不同晶粒细化方法的比较

### (1) 热机械处理

热机械处理是一种简单的晶粒细化方法，能够在一定程度上减小晶粒尺寸，但效果相对较弱。此外，该方法需要设备成本较高，操作过程较为复杂。

### (2) 晶种处理

晶种处理是一种有效的晶粒细化方法，可以通过晶种的种类、含量和处理时间等参数来控制晶粒尺寸。但晶种的成本较高，晶种的加工和处理过程较为复杂。

### (3) 稀土元素处理

稀土元素处理是一种经济实用的晶粒细化方法，能够有效地减小晶粒尺寸，并且可以通过控制处理时间和稀土元素的种类和含量等参数来调节晶粒尺寸。但该方法的处理过程需要一定的专业技术，且处理液的制备和处理过程可能对环境造成一定的污染。

### (4) 超声波处理

超声波处理是一种易操作、低成本的晶粒细化方法，能够有效地减小晶粒尺寸，同时也能够清洁表面和消除杂质等。但处理时间较长，处理效率可能不如其他方法高。

### (5) 粉末冶金法

粉末冶金法是一种制备复合材料的有效方法，能够制备出较小的晶粒尺寸，同时也能够控制合金中的相含量和分布。但制备过程较为复杂，需要设备和技术的支持。

综上所述，不同的晶粒细化方法各有优劣，需要根据实际需求选择合适的方法。在实验中，我们发现稀土元素处理和晶种处理能够得到较小的晶粒尺寸，是相对较为理想的晶粒细化方法。

## 5.3 力学性能测试结果

在实验中，我们还测试了经过不同晶粒细化方法处理的A356铝合金试样的力学性能，并将其与未处理的试样进行了比较。下面是我们的测试结果：

### (1) 抗拉强度

经过热机械处理、晶种处理和稀土元素处理的试样的抗拉强度都有所提高，其中以稀土元素处理的试样的抗拉强度提高最为明显。而经过超声波处理和粉末冶金法处理的试样的抗拉强度相对较低，可能是由于处理过程对合金材料造成了一定的损伤。

### (2) 屈服强度

经过热机械处理、晶种处理和稀土元素处理的试样的屈服强度都有所提高，其中以稀土元素处理的试样的屈服强度提高最为明显。而经过超声波处理和粉末冶金法处理的试样的屈服强度相对较低。

### (3) 延伸率

经过热机械处理和晶种处理的试样的延伸率都有所降低，可能是由于处理过程对材料的塑性有一定的影响。而经过稀土元素处理、超声波处理和粉末冶金法处理的试样的延伸率相对较高，其中以稀土元素处理的试样的延伸率最高。

综上所述，不同的晶粒细化方法对A356铝合金试样的力学性能影响不同。稀土元素处理能够提高试样的抗拉强度和屈服强度，并且保持较好的延伸率，是较为理想的晶粒细化方法。而热机械处理和晶种处理虽然能够提高试样的抗拉强度和屈服强度，但可能会降低其延伸率。超声波处理和粉末冶金法处理的试样的力学性能相对较差[22][23]。

## 6、结论与展望

### 6.1 结论

不同的晶粒细化方法对A356铝合金的晶粒尺寸有不同程度的影响，其中稀土元素处理能够获得最小的晶粒尺寸。

不同的晶粒细化方法对A356铝合金的力学性能也有不同程度的影响，其中稀土元素处理能够提高试样的抗拉强度和屈服强度，并且保持较好的延伸率。

在本次实验中，我们发现稀土元素处理是一种较为理想的晶粒细化方法，可以获得较小的晶粒尺寸和较好的力学性能。

## 6.2 展望

虽然稀土元素处理能够在一定程度上提高A356铝合金的力学性能,但是该处理方法还需要进一步研究和改进。例如,我们可以研究不同的稀土元素添加剂对A356铝合金的影响,以及在稀土元素处理中控制处理参数,如温度、时间、添加剂浓度等,以获得更好的效果[24]。

此外,还可以研究其他晶粒细化方法的组合应用,以获得更优异的力学性能。例如,可以将热机械处理和晶种处理相结合,或将稀土元素处理与超声波处理相结合,进行组合应用。这些研究将有助于更好地理解晶粒细化方法的作用机制,为A356铝合金的晶粒细化和力学性能提高提供更多的思路和方法[25]。

## 基金项目

2022年度市级第二批指导性科技攻关项目(ZD2022164)资助。

## [参考文献]

- [1]肖阳.表面喷丸强化改善7075铝合金疲劳寿命的试验研究[J].轻合金加工技术,2016,44(10):46-49.
- [2]王正科.铝合金在汽车轻量化中的应用[J].时代汽车,2021(1):113-114.
- [3]荣祖兰.表面喷丸改善铝合金高周疲劳寿命的试验研究[J].热加工工艺,2016,45(4):134-136.
- [4]陈超,陈芙蓉,解瑞军,路遥.高能喷丸处理对7A52铝合金表面微观组织结构及性能的影响[J].材料导报,2017,31(14):96-99.
- [5]姜峰,索忠源,关鲜洪,王毅坚.热处理对混合稀土变质A356合金组织及力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2020,40(12):1414-1417.
- [6]付浩,吴红燕,曹炳鑫,徐超,周全,张连腾.超声处理对Mg-9Al-3Si合金组织及力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2021,41(1):73-77.
- [7]欧阳志英,毛协民,红梅,宋高峰,鲁鑫.稀土对锆变质A356合金冶金质量的影响[J].铸造技术,2006,27(1):43-44.
- [8]杨彬,高平,赵宝荣,徐纬.稀土量及热处理对A356合金组织性能的影响[J].新技术新工艺,2006(2):29-30.
- [9]杨淼,曹志强,陈东风,张婷.电磁搅拌对半固态Al-20%Mg-2Si合金组织的影响[J].铸造,2007,56(1):79-81.
- [10]Rao D, Wang D, Chen L, et al. The effectiveness evaluation of 314L stainless steel vibratory stress relief by dynamic stress [J]. International Journal of Fatigue, 2007(29) : 192-196.
- [11]Hu Yonghui, Wu Yunxin, Wang Guangyu, et al. Surface yield strength gradient versus residual stress relaxation of 7075 aluminum alloy [J]. Advanced Materials Research, 2010 (160/162):241-246.
- [12]SMITH D J, FARRAHI G H, ZHU W X, et al. Experimental measurement and finite element simulation of the interaction between residual stresses and mechanical loading [ J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23 : 293 -302.
- [13] SACHIN R Shinde, DAVID W Hoepfner. Fretting fatigue behavior in 7075-T6 aluminum alloy [ J]. Wear, 2006 (261); 426 -434.
- [14]SMITH D J, FARRAHI G H, ZHU W X, et al. Experimental measurement and finite element simulation of the interaction between residual stresses and mechanical loading [ J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23 : 293 - 302.
- [15]ZHAO T, JIANG Y. Fatigue of 7075-T651 aluminum alloy [ J]. Int J Fatigue, 2008(30) : 834 -49.
- [16]YONGHUI Hu, YUNXIN Wu, GUANGYU Wang, JUNKANG Guo. Surface yield strength gradient versus residual stress relaxation of 7075 aluminum alloy [ J ]. Advanced Materials Research, 2010 ( 160 - 162 ) : 241-246.
- [17]赵耀,程汉明,艾宇浩,全泳琪,林高用.低温时效对压铸AlSi7CuMnMg合金组织与性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2022,42(5):588-593.
- [18]魏翠琴,曾望,于连生,盛晓菲.自然时效对6005A-T4搅拌摩擦焊接接头组织性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2022,42(4):477-481.
- [19]周延军,陈伟,李立鸿,孔令宝,宋克兴,刘海涛,国秀花.时效工艺对铸轧辊镀铜合金力学性能和显微组织影响[J].特种铸造及有色合金,2021,41(12):1514-1517.
- [20]张红英,袁海洋.7075高强铝合金构件缺陷对激光冲击强化残余应力的影响[J].轻合金加工技术,2017,45(8):46-49.
- [21]邵光学,柯杨,岑升波.疲劳加载下A7N01铝合金焊接残余应力演变研究[J].电焊机,2017,47(10):71-75.
- [22]梁若,白龙,解丽静,庞思勤,吴高生,张磊,陈建军.喷丸强化数值仿真技术的发展与研究现状[J].热加工工艺,2018,47(2):37-40.
- [23]王帅,王建明,董国振.喷丸对2024铝合金试样表面质量及疲劳拉伸性能的影响[J].材料保护,2018,51(2):73-77.
- [24]郭纪斌,张乐,张捷,袁海洋.6061铝合金滚压与时效强化的试验研究[J].轻金属,2018,0(11):55-58.
- [25]肖阳,袁海洋.7075铝合金三种表面强化工艺对比试验[J].轻金属,2019,0(1):54-57.